



# **PAKSUUSPROFIILIN HALLINTA KALANTERILLA**

Mikko Lintunen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2014  
Paperitekniiikan koulutusoh-  
jelma  
International Pulp and Paper  
Technology

# TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Paperitekniikan koulutusohjelma  
International Pulp and Paper Technology

MIKKO LINTUNEN:  
Paksuusprofiilin hallinta kalanterilla

Opinnäytetyö 33 sivua, joista liitteitä 0 sivua  
Toukokuu 2014

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia paperin paksuusprofiilin hallintaa kalanterilla. Tavoitteena oli tutustua laitteistoihin, joiden avulla paperin paksuusvaihteluja voidaan korjata. Tämä opinnäytetyö on Tampereen ammattikorkeakoululle tehty kirjallisuuskatsaus.

Alun yleisessä teoriaosassa käsitellään kalanterointia yleisesti keskittyen kuitenkin erityisesti paperin paksuuteen. Itse aihetta käsitellään tutustumalla käytössä oleviin profiilointitekniikoihin sekä niiden etuihin ja haittoihin. Lisäksi käsitellään paperin paksuuden on-line mittauksessa käytössä olevia mittaustapoja sekä perehdytään yleisesti tasaisen paksuusprofiilin merkitykseen.

Paperin poikkisuuntaista paksuusprofiilia voidaan hallita kalanterilla neljällä erilaisella tekniikalla. Näistä jäähdytysilmapuhallus, kuumailmapuhallus ja induktiokuumennus perustuvat lämpölaajenemisen hyödyntämiseen profiloinnissa. Kalanterin telan halkaisijaa joko kasvatetaan tai supistetaan kuumentamalla tai viilentämällä sitä kalanterin telan kohtaa, jossa paperiradan paksuusprofiilissa on liian suuria vaihteluita. Ilmapuhallustekniikoissa telaa lämmitetään tai jäähdytetään puhaltamalla viileää tai kuumaa ilmaa kalanterin telaan. Induktiotekniikassa lämmitys hoidetaan sähkömagneettisen induktion avulla. Monivyohyketelojen toiminta perustuu mekaanisiin vyöhykkeisiin, joita säädetään hydraulisesti kuormituselementeillä. Kuormituselementit kohottavat telavaipan pintaa siltä kohdista, jossa paperi on paksumpaa paperiradan poikkisuuntaiseen paksuusprofiiliin nähden.

Monivyohyketelat ovat investointikustannuksiltaan kalleimpia, mutta ne ovat myös selvästi tehokkaimpia ja nopeimpia sekä käyttövarmuudeltaan luotettavimpia laitteistoja. Monivyohyketelojen käyttökustannukset ovat pienimmät, joten pitkässä juoksussa ne tulevat halvimmiksi. Induktiokuumennustekniikka on taloudellisuudeltaan ja käyttövarmuudeltaan toiseksi paras tekniikka. Sen huonoja puolia ilmapuhallustekniikoihin nähden ovat hieman hitaammat vasteajat ja palautumisajat sekä leveämmät profiilointivyöhykkeet. Energiatehokkuus on paljon parempi.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme of Paper Technology  
International Pulp and Paper Technology

MIKKO LINTUNEN:  
Caliper Profile Control in the Calendering

Bachelor's thesis 33 pages, appendices 0 pages  
May 2014

---

The purpose of this thesis was to study paper caliper profile control in the calendering. The aim was to get to know the machinery that can correct paper caliper variations. This thesis was done to Tampere University of Applied Sciences as a literary research.

In the beginning of theory section calendering is covered in general yet focusing in paper caliper. The main topic is covered by going through the technologies used in profiling and by comparing advantages and disadvantages of different technologies. Additionally, different technologies used in online caliper measurement and the significance of smooth caliper profile are covered.

The cross-directional caliper profile of paper can be controlled by four different technologies. The operational principle of cool air shower, hot air shower and induction heating is based on heat expansion of metal. The diameter of calender roll is either increased or decreased by heating or cooling the exact spot on the calender roll where paper web has variations in caliper profile. In air showers the roll is heated or cooled by blowing cool or hot air on the calender roll. In induction heating the heating is taken care of by electromagnetic induction. The operation of multizone-adjustable roll is based on mechanical zones which are controlled hydraulically by loading elements. Loading elements lift the roll shell on that spot where paper web is thicker compared to cross-directional caliper profile.

Multizone-adjustable rolls have the highest investment costs but they are also the most effective and the fastest and the most reliable. Multizone-adjustable rolls have the lowest running costs so in the long run they are the cheapest choice. Induction heating technology has the second lowest running costs and it is the most reliable after multi-zone controlled rolls. The downsides of induction heating technology compared to air showers are slightly slower response times and recovery times and wider profiling zones. Energy efficiency is a lot better.

---

Key words: calendering, caliper profile, profile control

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	KALANTEROINNIN TEORIA.....	6
2.1	Kalanteroitumismekanismit.....	8
2.2	Kalanterointimenetelmät.....	9
3	PAKSUUDEN ONLINE-MITTAUS KALANTERILLA .....	10
3.1	Koskettava paksuusmittaus.....	10
3.2	Optinen paksuusmittaus .....	11
4	PAKSUUSPROFIILI HALLINTASUUREENA.....	13
5	PROFILOINTITEKNIIKAT .....	14
5.1	Profiilin säätö jäähdytysilmapuhalluksella .....	14
5.2	Profiilin säätö kuumailmapuhalluksella.....	15
5.2.1	Voithin kuumailmapuhalluslaitteisto .....	16
5.3	Profiilin säätö induktiokuumennuksella .....	17
5.3.1	Metson induktiokuumennuslaitteisto .....	20
5.3.2	Honeywellin induktiokuumennuslaitteisto .....	21
5.4	Profiilin säätö monivyöhyketelalla .....	21
5.4.1	Valmetin monivyöhyketela .....	25
5.4.2	Voithin monivyöhyketela.....	26
6	PROFILOINTILAITTEIDEN VERTAILU .....	27
7	POHDINTA.....	30
	LÄHTEET.....	32

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutustua tekniikoihin, joiden avulla pystytään hallitsemaan paperin paksuusprofiilia kalanterilla. Työssä perehdytään profilointilaitteistojen tekniikkaan ja käytössä olevien menetelmien etuihin ja haittoihin. Työ on Tampereen ammattikorkeakoululle tehty kirjallisuuskatsaus.

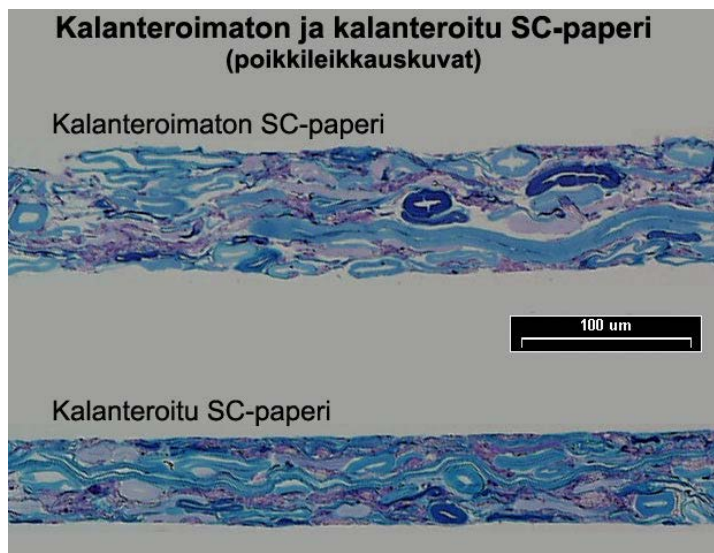
Kalanterointi on paperinvalmistuksen viimeinen prosessi, jossa voidaan vaikuttaa paperin paksuusprofiiliin. Epätasaisesta paksuusprofiilista aiheutuu ongelmia rullauksessa ja jatkojalostuksessa. Paksuusprofiilia voidaan hallita neljällä erilaisella tekniikalla kalanteroinnin yhteydessä.

Työn alussa esitellään kalanteroinnin teoriaa keskittyen erityisesti paperin paksuuteen vaikuttaviin seikkoihin. Yleisen teorian jälkeen esitellään paperin paksuuden online-mittaamiseen käytettävät mittaustavat. Online-mittareiden jälkeen perehdytään paperin paksuusprofiilin hallinnan yleiseen teoriaan. Tämän jälkeen keskitytään syvemmin käytössä oleviin profilointitekniikoihin. Työn lopussa vertaillaan eri profilointitekniikoiden etuja ja haittoja sekä pohditaan yleisesti aihealuetta.

## 2 KALANTEROINNIN TEORIA

Kalanterointi on jälkikäsittelyn prosessi, jonka tarkoituksena on muuttaa paperirainan tiettyjä ominaisuuksia, jotta se soveltuu lopulliseen käyttötarkoitukseensa. Kalanteroinnissa paperiraina menee kahden tai useamman telan muodostamasta nipistä, jossa siihen kohdistuu puristusvoimaa. Nippiin kohdistetun paineen ja lämmön vaikutuksen alaisena paperin pinta tasoittuu ja sen rakenne tiivistyy. Puristuksen tavoitteena on parantaa paperin pintaominaisuuksia, säätää paperin paksuutta ja tasata paperin paksuusprofiilia, jotta pituusleikkurilla saataisiin tasaisia rullia. (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterointi.)

Kalanterointi parantaa paperin kiiltoa, karheutta, huokoisuutta sekä absorptiota. Epätavottuja muutoksia ovat taivutusvastuksen heikkeneminen sekä vaaleuden ja opasiteetin huonontuminen. Lisäksi ilmenee kalanterointimustumaa. (Ahlstedt ym. 2010, 18.) Suurimmat muutokset rainan mittasuhteissa tapahtuvat paperin paksuudessa. Superkalanterointi voi jopa puolittaa paperin paksuuden. Kalanteroitaessa tapahtuu luonnollisesti myös paperin vähäistä levenemistä kokoonpuristumisen seurauksena. (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterointi.) Kuvassa 1 on esitettyä poikkileikkauskuvaa kalanteroimattomasta ja kalanteroidusta SC-paperista.



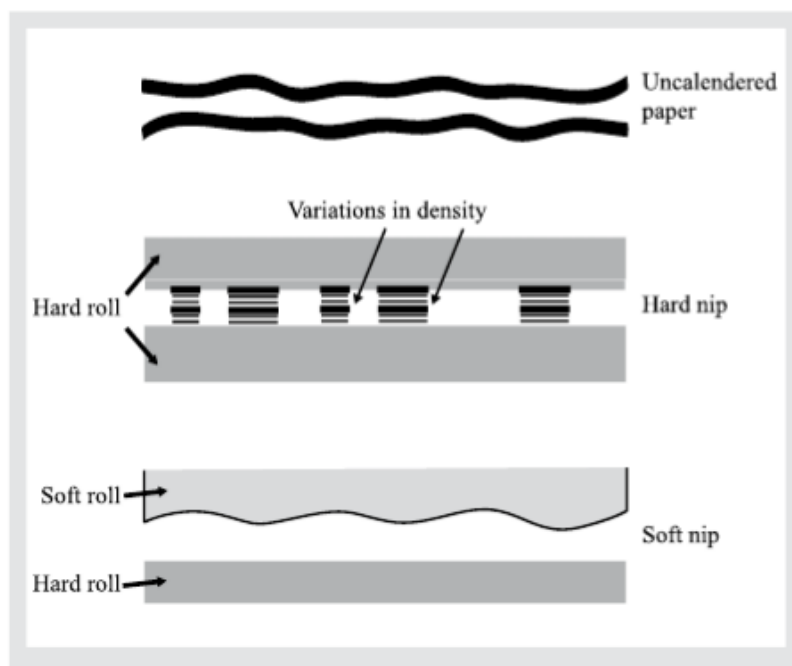
KUVA 1. Kalanteroinnin vaikutus paperin paksuusprofiiliin (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterointi).

Kalanteroinnin säädettävät prosessimuuttujat riippuvat kalanterin rakenteesta, mutta käytännössä säädettäviä parametreja ovat puristuspaine nipissä, nippien lukumäärä sekä

ajonopeus. Lisäksi telojen malli, materiaali ja mittasuhteet vaikuttavat kalanterointitulokseen. (Ahlstedt ym. 2010, 19.)

Viivakuorman kasvattaminen parantaa paperin haluttuja ominaisuuksia tiettyyn pisteeseen asti. Esimerkiksi paksuuden muutos on täysin riippuvainen tarpeeksi suuresta viivakuormasta. Nipin viivakuorma vaihtelee ulkoisen voiman, ajossa olevan paperilajin sekä telojen mittasuhteiden ja materiaalin mukaan, koska nipin konesuuntainen pituus on näistä riippuvainen. Nippien lukumäärä vaikuttaa erityisesti paperin sileyteen. (Ahlstedt ym. 2010, 19–20; AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterointi).

Telan materiaalilla on suuri vaikutus paperin paksuuden ja tiheyden muutokseen. Kovalla telalla kalanteroitaessa paperin paksuusprofiili on tasainen, mutta paperin sisäinen tiheys vaihtelee. Pehmeällä telalla tiheys on tasaisempi, mutta paperin paksuusprofiilissa on enemmän vaihteluita. (Ahlstedt 2010, 19–20.) Kuvassa 2 on kuvattuna nämä telan materiaalista riippuvat muutokset paperin paksuusprofiilissa ja sisäisessä tiheydessä.



KUVA 2. Paperin rakenne kovanippikalanteroinnin ja softkalanteroinnin jälkeen (Ahlstedt ym. 2010, 19).

## 2.1 Kalanteroitumismekanismit

Kalanteroinnissa tapahtuvat sileyden ja kiillon muutokset pyritään selittämään neljällä eri mekanismilla. Nämä mekanismit ovat rainan puristuminen, aineen siirtyminen ja hioutuminen, partikkelien suuntautuminen sekä kiillottavan pinnan jäljentyminen. Kuvassa 3 on selitetty ja kuvattu nämä kalanteroitumismekanismit.

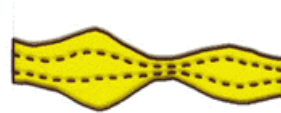
Sileyden syntymiseen näistä vaikuttavat eniten puristuminen ja siirtyminen. Puristuminen tarkoittaa, että rainan paksuusprofiilia tarkasteltaessa korkeammalla olevat kohdat puristuvat enemmän kasaan kuin matalalla olevat kohdat. Rainan plastisuudesta riippuu, kuinka pysyväksi tämä kokoonpuristuminen jää. Siirtymisessä ja hioutumisessa ainetta siirtyy paperirainassa olevilta harjanteilta matalammalla oleville kohdille. Paperirainan korkeimmat kohdat voivat myös hioutua kokonaan irti. Siirtyminen on prosessin kannalta parempi tapa, koska hioutuminen aiheuttaa paperirainan pölyämistä. (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterointi.)

Kiillon syntymisen kannalta tärkeimmät mekanismit ovat partikkelien suuntautuminen sekä kiillottavan pinnan jäljentyminen. Partikkelien suuntautuminen tarkoittaa epäsymmetrisesti suuntautuneiden pitkulaisten ja levymäisten partikkelien asettumista pinnan suuntaisiksi. Kiillottavan pinnan jäljentyminen tarkoittaa, että kalanterin pintojen epätasaisuudet jäljentyvät paperiin. Tämän vuoksi onkin tärkeää, että kalanterin telojen pinnat ovat sileitä. (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterointi.)



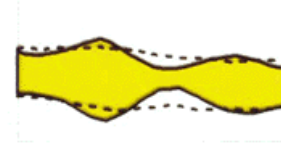
## Puristuminen

"Kukkulat" puristuvat enemmän kokoon kuin "laaksot" (kohtisuora puristusvoima ja koko rainan plastisuus vaikuttavana tekijänä)



## Siirtyminen ja hioutuminen

Ainetta siirtyy "kukkuloilta" "laaksoihin" (pinnan suuntaiset voimat ja pinnan plastisuus vaikuttavat). "Kukkulat" voivat myös hioutua.



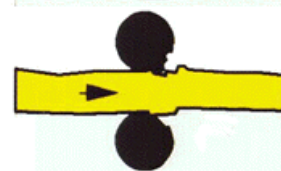
## Suuntautuminen

Pitkulaiset ja levymäiset osaset asettuvat pinnan suuntaisiksi (pinnan suuntaiset voimat ja pinnan plastisuus)



## Jäljentyminen

Paperi toistaa pintakuvion (kohtisuorat voimat ja pinnan plastisuus)



KUVA 3. Kalanteroitumismekanismit (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterointi).

## 2.2 Kalanterointimenetelmät

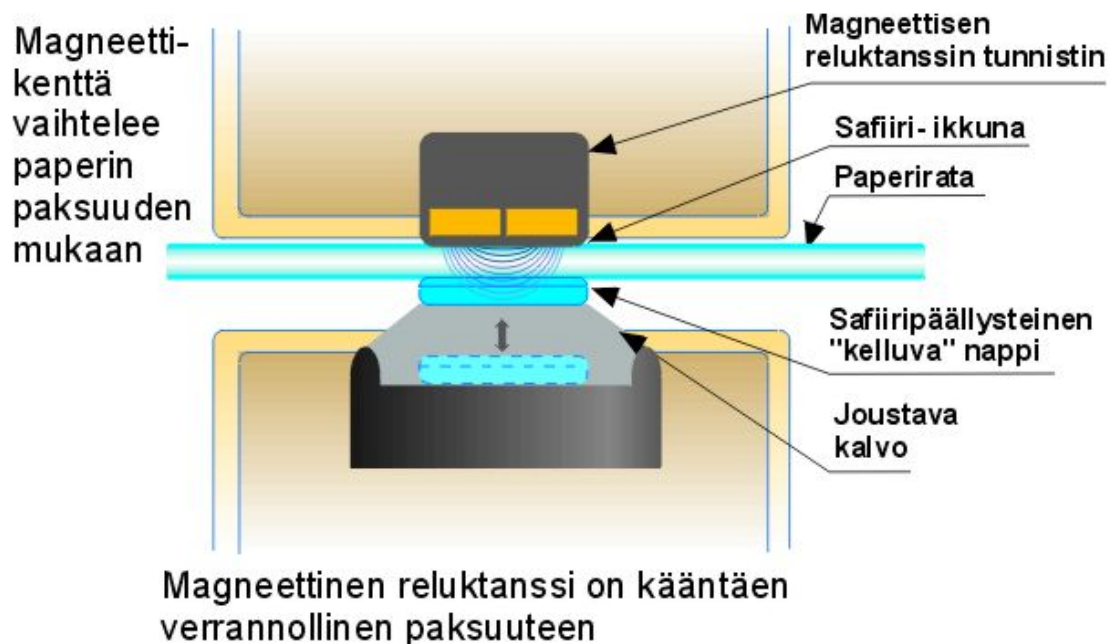
Kalanterit voidaan jaotella yleisesti esikalantereihin ja viimeistelykalantereihin. Esikalanterien tehtävänä on valmistaa paperi seuraavaan prosessivaiheeseen, kuten päällystykseen. Viimeistelykalanterien tehtävänä on muokata paperin ominaisuuksia niin, että se soveltuu parhaiten loppukäyttötarkoitukseensa. (Ahlstedt ym. 2010, 15.) Kalanterit voivat olla joko on-line kalantereita tai off-line kalantereita. On-line kalanterit ovat suorassa yhteydessä paperikoneeseen, joten paperirainaa ei tarvitse erikseen rullata ennen niitä. Off-line kalanterit sijaitsevat jälkikäsitelystä irrallisina paperikoneesta. Yleisimmät kalanterointimenetelmät ovat kovanippikalanterointi, softkalanterointi sekä monitelakalanterointi. (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterointi.)

### 3 PAKSUUDEN ONLINE-MITTAUS KALANTERILLA

Paperin paksuutta voidaan mitata paperikoneella paperin pintaa koskettavalla paksuusmittarilla, puolikoskettavalla optisella mittarilla tai koskettamattomalla optisella mittarilla. Tässä kappaleessa on käyty läpi nämä mittaustavat.

#### 3.1 Koskettava paksuusmittaus

Koskettavan paksuusmittarin toiminta perustuu paperin pintaa pitkin liukuvaan magneettivastukseen, joka on kiinnitettyä mittapähkään. Yläpuolen mittapäässä on magneetikela ja alapuolen mittapäässä ferriittilevy. Mittapäiden väliin muodostuu sähkövirta, jonka suuruus on riippuvainen kelan ja ferriittilevyn välisestä etäisyydestä. Magneetikela on liitetty oskillaattoriin, joka muuntaa tämän sähkövirran jännitepulsseiksi. Tietokone laskee pulssit ja muuntaa ne paksuuslukemiksi. Tämän tyyppistä paksuusmittausta käytetään normaalisti 25–2000 µm paksuiseen paperiin. Kuvassa 4 on esitetty koskettavan paksuusmittarin rakenne. (AEL / Proledge Oy 2013, Paksuuden mittaaminen.)

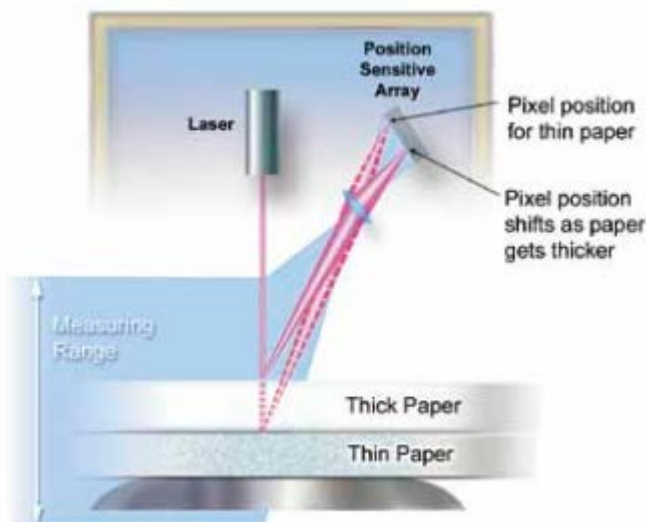


KUVA 4. Kosketukseen perustuvan paksuusmittarin toiminta (AEL / Proledge Oy 2013, Paksuuden mittaaminen).

Koskettava paksuusmittaus on tarkkuudeltaan paras mittausmenetelmä, mutta paperin puristaminen saattaa aiheuttaa ratakatoja ja reikiä paperiin. Päälystettyjen paperien osalta saattaa esiintyä naarmuuntumista. Nämä johtuvat mittapäiden kulumisesta ja liikaantumisesta. (AEL / Proledge Oy 2013, Paksuuden mittaaminen.)

### 3.2 Optinen paksuusmittaus

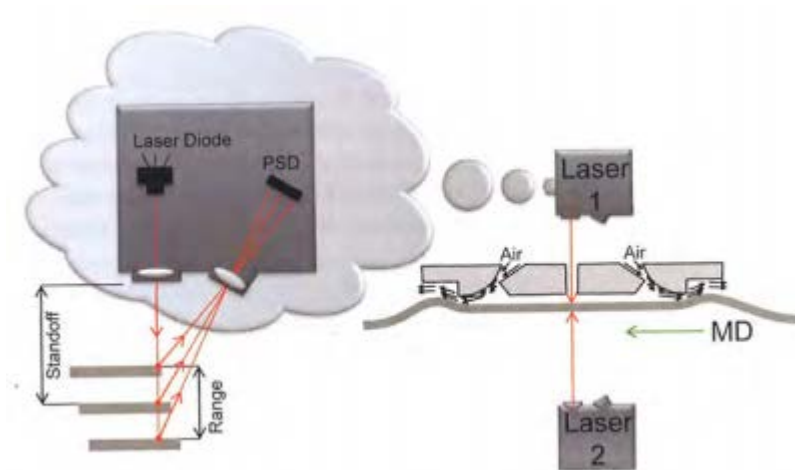
Metson valmistamassa IQCaliper-L –paksuusmittarissa käytetään sekä perinteisissä koskettavissa paksuusmittareissa olevaa magneettivastusmittausta, että uutta ilman kosketusta toimivaa optista teknologiaa, joka perustuu laserkolmiomittaukseen. Paperi imaistaan viitelevyyn pienellä tyhjiöllä, joka poistaa paperin ja levyn välistä ilman. Viitelevy on sileäpintainen ja sen ja paperin välissä on vain pieni paine, joten se ei aiheuta katoja eikä vikoja paperiin. Magneettivastusmittausta käytetään mittaamaan laserin etäisyyttä viitelevyyn. Laserin avulla tapahtuvan kolmiomittauksen avulla taasen määritetään paperin pinnan positio. Paperin paksuus selviää, kun nämä kaksi mittausta vähennetään toisistaan. Kuvassa 5 on esitetty kyseisen paksuusmittarin toimintaperiaate. (Williamson 2009, 36.)



KUVA 5. Metson optisen paksuusmittarin toiminta (Williamson 2009, 36).

Honeywell ja Voith Paper Automation valmistavat täysin koskettamatonta optista paksuusmittaria. Paperirata ohjataan ilman avulla antureiden välistä, jolloin Metson käyttämää viitelevyä ei tarvita. Honeywellin mittarissa käytetään kahta laseriin perustuvaa paperin pinnan ilmaisinta, jotka mittaavat samaan aikaan paperin pintaa ja pohjaa. Toi-

mintaperiaate on samankaltainen kuin Metson mittarilla. Paperi saadaan pysymään koh-tisuorassa antureihin nähden Honeywellin suunnittelemalla ”ilmatasolukituksella”, jossa käytetään hyväksi Coanda-ilmiötä eli paperia pidetään alipaineen avulla suorassa. Kuva 6 esittää Honeywellin mittarin toimintaperiaatteen. (Williamson 2011, 15–16.)



KUVA 6. Honeywellin optinen koskettamaton paksuusmittari (Williamson 2011, 15).

Optisen paksuusmittauksen etuna on, että siinä ei ole likaantuvia osia, jotka voisivat aiheuttaa katkoja, joten paperin ajettavuus paranee. Paperiin ei tule myöskään reikiä ja markkeerausta ei esiinny. Metson valmistaman optisen paksuusmittarin mittausalue on 35–700  $\mu\text{m}$ , joten se ei sovellu yhtä paksuille paperilajeille kuin perinteinen koskettava paksuusmittari. (Metso IQ Laser Caliper Measurement; Williamson 2011, 18.)

#### 4 PAKSUUSPROFIILI HALLINTASUUREENA

Tasainen paksuusprofiili on yksi tärkeä vaatimus paperille. Epätasainen paksuusprofiili aiheuttaa vaihtelua rullien läpimitoissa, joten ajettavuuden kanssa ilmenee ongelmia jälkikäsittelyn lisäksi painotaloissa sekä jatkojalostuksessa. Epätasainen halkaisija rullan poikkisuunnassa saattaa aiheuttaa rullauksessa pantoja, pussittamista, halkeamia ja vaihtelua rullan kovuudessa. Lisäksi epätasaisen paksuuden vuoksi ilmenee epätasaisia saumoja rullaimella, tampusurilla sekä painopuristimella ja siitä voi aiheutua ongelmia mahdollisesti myös päällystyksessä ja jatkojalostuksessa. (Enwald ym. 2010, 178; AEL / Proledge Oy 2013, Paksuuden mittaaminen.)

Paksuusprofiilin vaihteluita syntyy sekä neliömassavaihtelusta että epätasaisesta kalanteroinnista. Neliömassavaihtelua aiheutuu kuivatuskutistumasta sekä retentio- ja vedenpoistoprofiileista. Lisäksi viirojen, vedenpoistoelementtien ja perälaatikon virheet aiheuttavat heittoja neliömassaprofiilissa. (Wanigaratne, Faltas, Saunders & Virta 2011, 350–355; AEL / Proledge Oy 2013, Neliömassan säätö.)

Tasainen paksuusprofiili on erityisen tärkeä hyvää ajettavuutta vaadittavilla paperilajeilla. Epätasainen paksuusprofiili aiheuttaa katkoja painokoneella ja rullauksessa. Hyvää ajettavuutta vaaditaan muun muassa sanomalehtipaperilta ja SC-paperilta. Näitä samoja ominaisuuksia vaaditaan myös sellupohjaisilta painopapereilta, joista yhtenä yleisimpänä esimerkkinä kopiopaperi. Tasainen paksuusprofiili on kriittinen ominaisuus lisäksi myös kartongeille, joilta vaaditaan hyviä painatusominaisuuksia. Tällaisia ovat muun muassa taivekartonki, sellukartonki sekä nestepakkauskartonki. (AEL / Proledge Oy 2013, Paperit.)

Kappaleessa 5 käydään läpi tekniikoita, joilla voidaan parantaa paperin paksuusprofiilia kalanterilla.

## 5 PROFILOINTITEKNIIKAT

Paperin epätasaista poikkisuuntaista paksuusprofiilia voidaan hallita kalanterilla jäähdytysilmapuhalluksella, kuumailmapuhalluksella, induktiokuumennuksella ja monivyöhyketelalla. Näistä kolme ensimmäistä käyttävät paperin paksuuden profiloinnissa hyväksien metallin lämpölaajenemista, kun taas monivyöhyketela on mekaaninen ratkaisu. Kuumailmapuhallus- ja induktiotekniikka vaikuttavat myös poikkisuuntaiseen kiiltoprofiiliin, koska tekniikassa käytettävät lämpötilat ovat niin korkeita. Ne voivat vaikuttaa jonkin verran myös sileyteen. Monivyöhyketelaa käytettäessä ei ole tätä ongelmaa. (Hoelzel 2005, 14; Ahlstedt ym. 2010, 150.)

Tässä osiossa on käyty tarkemmin läpi näiden profilointilaitteistojen tekniikkaa ja etuja sekä haittoja. Yleisen teorian lisäksi tässä kappaleessa on esitetty paperiteollisuudelle laitteita toimittavien yritysten profilointilaitteiden tekniikkaa.

### 5.1 Profiilin säätö jäähdytysilmapuhalluksella

Paksuusprofiilin säätö ilmapuhalluksella on vanhaa tekniikkaa, joka on siirtymässä siivuun uudempien innovaatioiden tieltä. Paksuusprofiilia hallitaan puhaltamalla 15–20 asteista ilmaa siihen kohtaan kalanterin telaa, jossa paperirata on muita kohtia ohuempaa. Kalanterin telan jäähtyessä sen halkaisija pienenee, jolloin kalanteri puristaa vähemmän paperiradassa ollutta kohtaa. Tämän ansiosta paperin paksuus kasvaa tältä kohdasta. Nykyään ilmaventtiileitä hoidetaan tietenkin tietokoneen avulla, mutta ennen sylinterimies hoiti tämän manuaalisesti käsisäätöisin ilmasuuttimin. (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterin profiilinsäätölaitteet.)

Monitelakalantereihin asennetaan nykyään yleensä kaksi eri jäähdytysilmatukkia. Tietokoneohjauksella toimivat venttiilisuuttimet asennetaan samalla jaolla paperikoneen poikkisuunnassa kuin perälaatikon huuliruuvit. (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterin profiilinsäätölaitteet.)

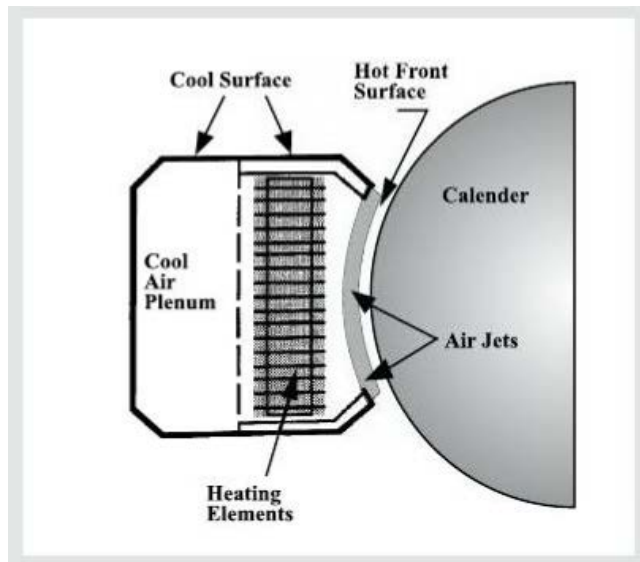
## 5.2 Profiilin säätö kuumailmapuhalluksella

Profiilin säätö kuumailmapuhalluksella on tekniikaltaan samankaltainen kuin jäähdytysilmapuhalluslaitteisto. Molemmat laitteistot vaativat puhaltimen, kanaviston, ilman suodatuksen sekä ilman lämpötilasäädön. Profiloinnin toimintaperiaate on vain vastakkainen: jäähdytysilmalaitteistolla halutaan paperia paksummaksi, kun taas kuumailmapuhalluslaitteistolla sitä halutaan ohuemmaksi. Kuumailmapuhalluksessa kuumaa ilmaa puhalletaan kalanterin telan siihen kohtaan, jossa paperirata on liian paksu poikkisuuntaiseen paksuusprofiiliin nähden. Telan kuumentuessa entisestään se laajenee ja puristaa paperirataa kasaan muita kohtia enemmän. (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterin profiilinsäätölaitteet.)

Kuumailmapuhalluspalkki asennetaan energiahäviöiden minimoimiseksi hyvin lähelle kalanterin telaa. Laitteisto on keskimäärin noin 9 millimetrin päässä kalanterin telan pinnasta. Muotoilultaan se on telan mallinen eli kovera. Palkkiin on asennettu poikkisuunnassa ilmasuuttimia, joista jokaisella on oma erikseen säädettävä lämpövastuksensa. Jäähdytysilmaan perustuvista profiilinsäätölaitteista poiketen kuumailmapuhalluslaitteistossa on koko ajan puhallus päällä jokaisessa ilmaventtiilissä. Ilmanpaine on jokaisessa venttiilissä sama, mutta ilman lämpötila vaihtelee tarpeen mukaan. Alimmillaan ilman lämpötila on noin 30 °C, joten tällä on myös telaa jäähdyttävä vaikutus. (Hoelzel 2005, 15; AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterin profiilinsäätölaitteet.)

Kuvassa 7 on havainnollistettu kuumailmapuhalluslaitteiston toiminta. Kuvan laitteistossa ilmaa lämmitetään sähköisillä lämmityskennoilla. Profilointialue on poikkisuunnassa 38 millimetriä leveä. Profilointivyöhykkeitä saa myös 76 millimetrin levyisinä. Korkein ilmasuihkun lämpötila on 450 °C, joka saavutetaan 79 kW/m teholla. (Ahlstedt ym. 2010, 152.)

Kuumailmapuhalluslaitteistoon on mahdollista saada myös ilmakaapimia, jotka erottavat vyöhykkeet toisistaan. Näiden avulla profilointialueista voidaan saada hyvin kapeita, koska lämpöä ei pääse siirtymään kovin paljoa viereisille vyöhykkeille. Induktiokuumennuslaitteistoon nähden vyöhykkeet ovat selvästi kapeampia. (Hoelzel 2005, 16.)



KUVA 7. Kuumailmapuhalluslaitteiston toiminta (Ahstedt ym. 2009, 152).

### 5.2.1 Voithin kuumailmapuhalluslaitteisto

Voith valmistaa OnQ ModuleTherm –merkkistä kuumailmapuhalluslaitteistoa. Sen toimintaperiaate on sama kuin muillakin kuumailmapuhalluslaitteilla eli ilmaa lämmitetään puhaltamalla sitä lämmitysvastusten läpi ja ohjaamalla telan pinnan siihen kohtaan, jossa vaaditaan paperiradan paksuusprofiilin säätämistä. Telan pinnan lämmitessä sen halkaisija kasvaa, jolloin se puristaa paperia muita kohtia enemmän. Yllä olevassa kuvassa numero 7 on kuvattu yleisesti kuumailmapuhalluslaitteiston rakenne. Alla olevassa kuvassa numero 8 on Voithin OnQ ModuleTherm –laitteisto. Kuvasta erottuu hyvin kuinka tiheästi ilmaventtiilit sijaitsevat palkissa.



KUVA 8. Voithin OnQ ModuleTherm kuumailmapuhalluslaitteisto (OnQ ModuleTherm 2012).



Kuten muissakin kuumailmapuhalluslaitteissa Voithin laitteistossa on jatkuva puhallus päällä jokaisessa ilmaventtiilissä. Ainoastaan lämmityselementtien tehoa säädetään. Tehon ollessa siis lähellä nollaa profilointivyöhykkeellä on jäähdyttävä vaikutus. OnQ ModuleTherm –laitetta valmistetaan kahta eri mallia, joista toisessa maksimi lämmitys-teho on 46 kW/m ja tehokkaammassa versiossa 66 kW/m. Laitetta saa joko 38 mm tai 76 mm levyisillä profilointivyöhykkeillä. Tehokkaamman version puhalluskapasiteetti on 1400 kuutiota tunnissa metrin levyiselle alueelle 2,5-3 kPa paineella. OnQ ModuleTherm soveltuu jokaiselle paperi- ja kartonkilaadulle ja se voidaan asentaa kaikkiin kalantereihin. (OnQ ModuleTherm 2012; Voith OnQ ModuleTherm.)

Kappaleessa 5.3 läpikäytävä induktiokuumennus perustuu ilmapuhallusten lailla myös lämpölaajenemiseen, mutta se on tekniikaltaan uudempi ja tehokkaampi.

### 5.3 Profiilin säätö induktiokuumennuksella

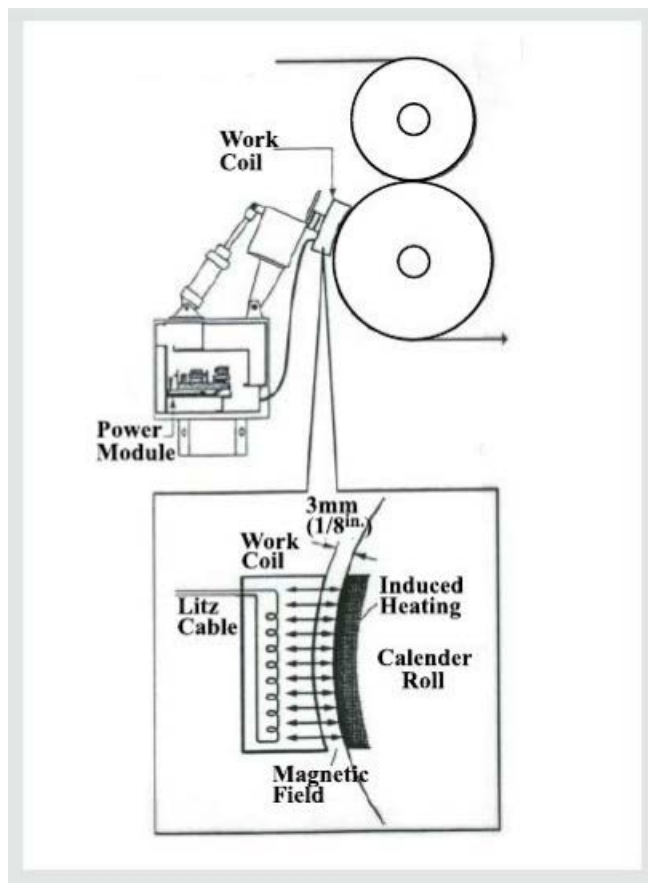
Induktiokuumennuksen pääperiaate on kalanterin sylinterin pintaa kuumentamalla kasvattaa sylinterin halkaisijaa, jolloin viivakuorma kasvaa kuumennuskohdassa. Viivakuorman kasvun seurauksena paperin pintaan kohdistuu suurempi voima ja se puristuu enemmän kasaan kuin muista kohdista. Tämä vaikuttaa paksuuden lisäksi suoraan myös kiiltoon, mutta epäsuorasti myös rullien muodostumiseen ja kovuusprofiiliin. Induktiokuumennuksen toimintaperiaate on samankaltainen kuin kuumailmapuhalluksessa. Induktiokuumennuksen energian hyötysuhde voi olla jopa 95 prosenttia. Tekniikan huonoja puolia ovat korkea energiankulutus sekä hidas reaktioaika paksuusprofiilivirheen mittaamisesta sen korjaamiseen. (Ahlstedt ym. 2010, 113, 152.)

Induktiokuumennussysteemi koostuu induktiokäämistä sekä taajuusmuuntimesta. Taajuusmuunnin synnyttää korkeataajuuksisen sähkövirran, joka ohjautuu käämille. Käämi vuorostaan muodostaa magneettisen virtapiirin kalanterin telan kanssa. Tela lämpenee, kun magneettivuo synnyttää pyörrevirtauksia kalanterin telassa. Induktiokuumennus ei vaadi minkäänlaista väliainetta, kuten kuumailmapuhallus, vaan ilmiö muodostuu suoraan kalanterin telassa. Telan on luonnollisesti oltava magneettinen ja lämmönkestävä. (Ahlstedt ym. 2010, 113.)

Induktiokuumennuslaitteiston etulevy on normaalisti hyvin lähellä kalanterin telaa, välimatka on yleisesti vain 3–5 millimetriä. Induktiokuumennuspalkki on usein suunniteltu niin, että sen saa siirrettyä kauemmas kalanterin pinnasta huoltotöitä varten. Induktiokuumennuspalkki pitää sisällään luonnollisesti useita magneettikäämejä, jotta paksuuden profilointi on mahdollista pienessä mittakaavassa koko paperiradan leveydeltä. Normaalisti magneettikäämit on sijoitettu 60–75 millimetrin välein koko radan leveydeltä. Lämmön siirtymistä ei saada rajoitettua pelkästään vyöhykkeen sisään, joten profilointivaikutus on itse vyöhykkeitä leveämpi. Induktiokuumennuksella voidaan pienentää paperin paksuutta 10–30 µm riippuen kalanterityypistä. (Ahlstedt ym. 2010, 113; Hoelzel 2005, 15.)

Ahlstedtin ym. (2010, 113) mukaan kalanterin telojen lämpötilojen noustessa yli 250 °C induktiokuumennuslaitteiston toimintavarmuus voi heiketä. Honeywell on kuitenkin kehittänyt laitteiston, jonka avulla voidaan profiloida 300 °C pintalämpötiloihin asti. Suuren tehотиheyden ja induktiokuumennuspalkin korkean lämpötilan toimintaympäristön vuoksi induktiokuumennuspalkissa on oltava kunnollinen jäähdytys. Tätä vaativat varsinkin taajuusmuuntimet ja magneettikäämit. Jäähdytys voidaan hoitaa joko ilmalla tai vedellä. Vedellä jäähdytetään normaalisti laitteistot joita käytetään suurilla tehoilla korkean lämpötilan toimintaympäristössä. Honeywellin korkeille lämpötiloille kehitetyssä laitteistossa on myös vesijäähdytys. (Ahlstedt ym. 2010, 113–114; Calcoil CW Induction Heating System 2011.)

Kuvassa 9 on havainnollistettu induktiokuumennuksen rakenne sekä toimintaperiaate.



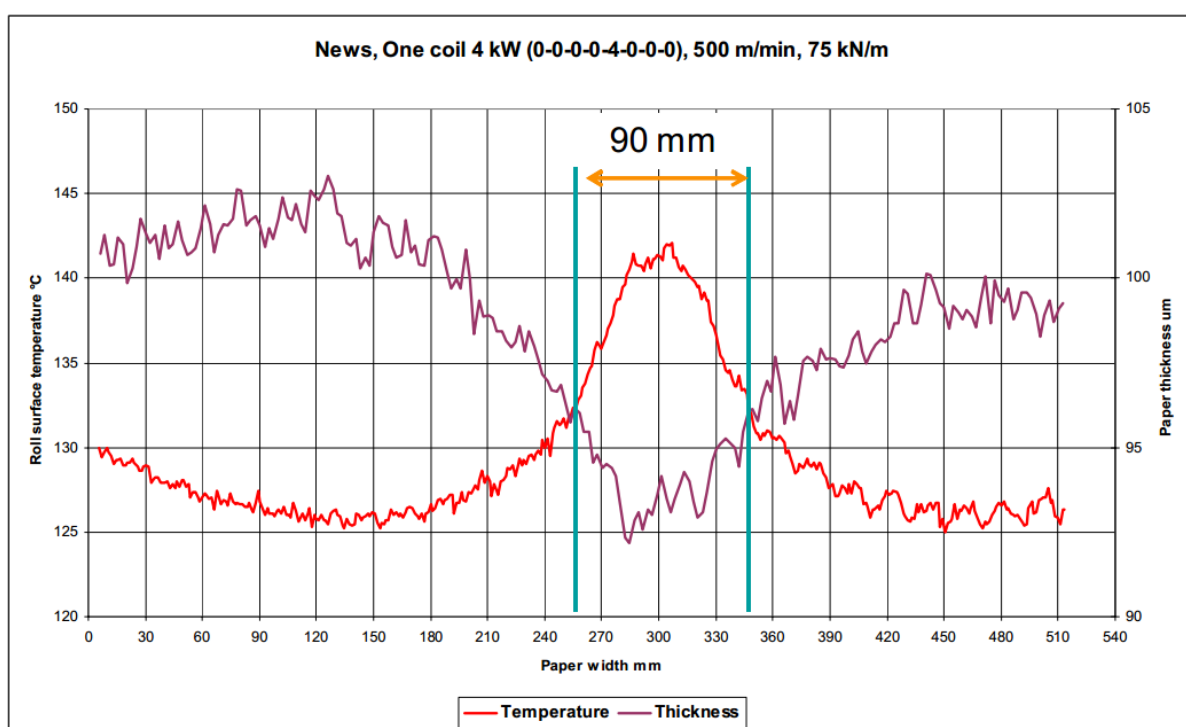
KUVA 9. Induktiokuumennuslaitteiston rakenne (Ahlstedt ym. 2010, 152).

Taajuusmuuntimet synnyttävät laitevalmistajasta riippuen maksimissaan 4-6 kilowatin suuruisen tehon erikseen jokaisen vyöhykkeen magneettikäämille tarpeesta riippuen. Kuvassa 10 on esitetty Metson induktiokäämin paksuutta profiloiva vaikutus 4 kilowatin teholla. Taajuusmuuntimet voidaan asentaa joko induktiokuumennuspalkin sisälle tai erilliseen laitekaappiin. (Ahlstedt ym. 2010, 113, 151.)

Induktiokuumennuslaitteistoa käytetään yleisimmin kovanippi- ja softkalantereissa paksuuden hallintaan, mutta sitä voidaan käyttää kaikissa kalantereissa ja melkein kaikkiin mahdollisiin paperilaatuihin. Laitteiston asennuspaikka riippuu kalanterityypistä. Monitelakalanterissa viivakuorma on sama jokaisessa nipissä, joten induktiokuumennuslaitteisto voidaan asentaa ensimmäiseen mahdolliseen termotelaan. Paperin kosteus ja elastisuus on siinä korkeimmillaan, joten paperin paksuuden muokkaaminen on tehokkainta. Superkalanterissa viivakuorma on suurimmillaan viimeisessä nipissä, joten se on paras sijainti paksuuden profilointia varten asennettavalle induktiokuumennuslaitteistolle. (Ahlstedt ym. 2010, 114.)

### 5.3.1 Metson induktiokuumennuslaitteisto

Metso markkinoi induktiokuumennuslaitteistoaan Metso IQ Induction –tuotenimellä. Sen toimintaperiaate on samanlainen kuin kappaleessa 5.3 on selitetty. Metso lupaa markkinoiden kapeimpia vyöhykkeitä, jolloin paperin profiloinnin pitäisi olla tarkinta pienessä mittakaavassa. Vyöhykkeet ovat 60 millimetrin levyisiä. Energian hyötysuhteeksi Metso lupaa 94 prosenttia. (IQ Induction Pro.) Metson laitteistoa voidaan käyttää kaikissa kalantereissa ja kaikkiin paperilajeihin (Svensk 2013, 12). Kuvassa 10 on esitetty Metson induktiokuumennuslaitteistolla aikaansaatu paperin paksuuden muutos sanomalehtipaperikoneella. Testissä on käytetty yhtä induktiokäämiä 4 kW teholla.



KUVA 10. Induktiokäämillä aikaansaatu vaikutus sanomalehtipaperin poikkisuuntaiseen paksuuteen (Svensk 2013, 11).

Kovanippikalanterissa ja softkalanterissa induktiokuumennuslaitteisto asennetaan lämpötelaan vasten. Kovanippikalanterissa lämmitys on tehokkaampaa kuin softkalanterissa. Softkalanterissa profilointi vaikuttaa myös kiiltoon ja sileyteen. Superkalanterissa ja monitelakalanterissa on tyypillisesti asennettuna kaksi induktiokuumennuspalkkia, yksi yläosassa ja yksi alaosassa. Palkki asennetaan näissäkin kalantereissa lämpötelaan vasten. Paperin paksuuden hallintaan riittää yksi palkki, mutta induktiokuumennuslaitteistolla voidaan vaikuttaa myös kiiltoon ja sileyteen. (Svensk 2013, 12–14.)

### 5.3.2 Honeywellin induktiokuumennuslaitteisto

Honeywell markkinoi induktiokuumennuslaitteistoaan Calcoil CW Induction Heating System – tuotenimellä. Profiloitivyöhykkeet ovat 75 millimetrin levyisiä eli 15 millimetriä leveämpiä kuin Metson vastaavassa laitteistossa. Energiatohokkuudeksi Honeywell lupaa samaa 94 prosenttia kuin Metsokin. Honeywellin mukaan tällä laitteistoilla pystyy vähentämään profiilivaihteluita jopa 90 prosenttia. (Calcoil CW Induction Heating System 2011.)

Pyörrevirtaukset synnyttävät lämpöä 0,05 millimetrin syvyydessä kalanterin telan pinnasta. Korkeammille lämpötiloille suunniteltu induktiokuumennuspalkki pystyy toimimaan 300 asteen pintalämpötiloihin asti. Nämä palkit ovat vesijäähdytteisiä. Matalammille lämpötiloille suunniteltu laitteisto pystyy toimimaan 130 asteen pintalämpötiloihin asti. Induktiokuumennuslaitteiston saa joko 4500 W tai 6000 W ulostulolla. (Calcoil CW Induction Heating System 2011.)

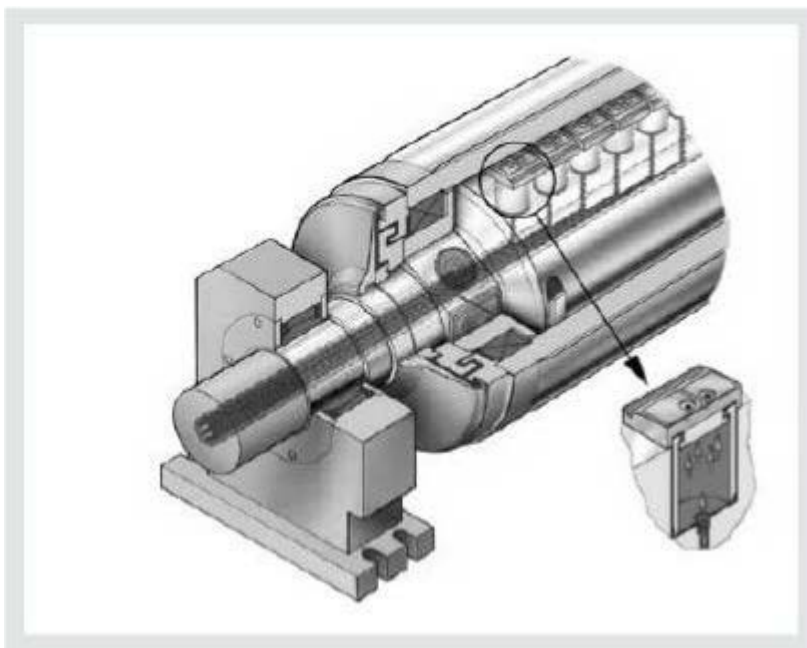
Normaalista poiketen Honeywellin induktiokuumennuslaitteiston magneettikäämit on asennettu pieneen kulmaan kalanterin telaan nähden. Tällä saadaan poistettua profiloitivyöhykkeiden kylmät kohdat sekä estettyä kiertävän sähkövirran syntyminen kalanterin telassa. (Calcoil CW Induction Heating System 2011.)

### 5.4 Profiilin säätö monivyöhyketelalla

Monivyöhyketelojen kehitys alkoi 1990-luvulla uusien uivien taipumakompensoitujen telojen kehityksen myötä (Ahlstedt ym. 2010, 150). Uivia teloja seurasivat vyöhykesäätettävät telat, jotka mahdollistivat isomman mittakaavan profiloinnin. Tela oli jaettu 6–8 vyöhykkeeseen, joten pienen mittakaavan paksuusprofiilin muokkaaminen ei ollut mahdollista. Nykyaikaisissa monivyöhyketeloissa on jopa yli 60 vyöhykettä ja vyöhykkeiden leveydet ovat 150–250 millimetriä. Kuvassa 11 on esitetty monivyöhyketelan rakenne. Ahlstedtin ym. (2010, 150) mukaan telan vaipan jäykkyyden vuoksi paperin paksuutta voidaan profiloida normaalisti 400–800 mm levyisillä vyöhykkeillä, vaikka teknisesti vyöhykkeet ovatkin paljon kapeampia. Robertsonin (2000, 564–565) mukaan profilointia voidaan suorittaa vyöhykkeiden mäntien välisiä etäisyyksiäkin kapeammalta

alueelta, koska nipin viivakuorma missä tahansa telan pisteessä koneen poikkisuunnassa on seurausta usean eri vyöhykkeen päällekkäin menevästä puristusvoimasta. Matemaattisesti yhdistelemällä näitä vastekäyriä voidaan profiloida kapeampia alueita. (Robertson 2000, 564–565; Ahlstedt ym. 2010, 150–151; AEL / Proledge Oy 2013, Telatyypit ja rakenteet.)

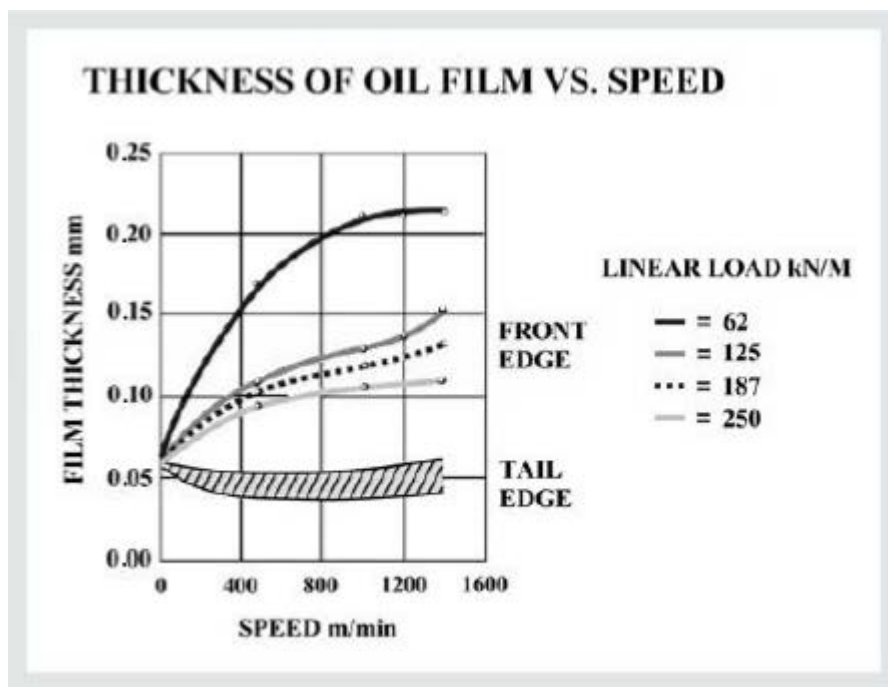
Monivyöhyketelojen etuina ovat muun muassa profiloinnin nopeus, tarkkuus ja tehokkuus. Muita etuja ovat värähtelyjen vaimennus, alhainen tehonkulutus ja pitkät huoltovälit. (Ahlstedt ym. 2010, 150–151; AEL / Proledge Oy 2013, Telatyypit ja rakenteet.)



KUVA 11. Vyöhyksäadettävän telan rakenne (Ahlstedt ym. 2010, 151).

Vyöhyksäadettävissä teloissa telan pintaan kohdistuva nippipaine ohjataan hydrostaattisilla kuormituselementeillä telan keskiakselin kannettavaksi. Tämä onnistuu johdattamalla öljyä keskiakselissa kiinni olevaan mäntään, jonka päässä vaipan alla on liukukengä. Öljy etenee männässä olevien kanavien ja kuristussuutinten kautta liukukengän öljytaskuihin, josta se leviää kengän reunoilta liukukengän ja vaipan väliin muodostaen öljykalvon. Liukukengä painuu vaippaa vasten syötetyn öljyn paineeseen verrannollisella voimalla. Kengä on suunniteltu niin, että sen on mahdollista kallistua mäntään nähden, jotta se pääsee asettumaan suoraan asentoon vaippaa kohden riippumatta akselin taipumisesta. Kengässä on hydrodynaamiset viisteet, joiden avulla öljykalvo kasvaa suurilla nopeuksilla samalla pienentäen tehonkulutusta. Kuvassa 12 on esitetty öljykalvon paksuuden riippuvuus kalanterin ajonopeudesta. Jokainen vyöhyke koostuu omasta

kuormituselementistä ja öljynsyötöstä ja kaikilla vyöhykkeillä on erillinen säätöventtiili. (AEL / Proledge Oy 2013, Telatyypit ja rakenteet.) Vaipan pinta voi olla joko kokillivalurautaa, polyymeripintaista valurautaa tai taottua terästä (Ahlstedt ym. 2010, 91).



KUVA 12. Öljykalvon paksuus nopeuden suhteen (Ahlstedt ym. 2010, 92).

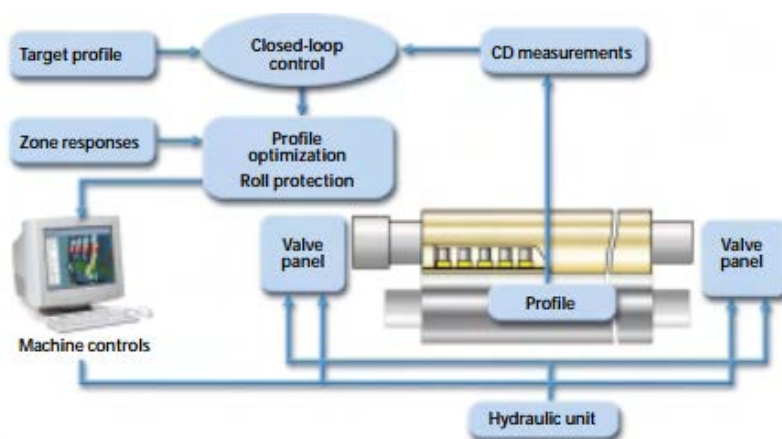
Kuvasta 12 näkee, että öljykalvon paksuus kasvaa selvästi kalanterin ajonopeuden kasvaessa. Öljykalvon paksuus kasvaa suhteessa vähemmän mitä suurempi viivakuorma nipissä on. Öljykalvon paksuuden kasvu auttaa pitämään liukukengän vakaana. Öljykalvon paksuus ja viskositeetti vaikuttavat myös vaipan pyörimiseen tarvittavan energian määrään. (Ahlstedt ym. 2010, 92.)

Monivyöhyketelan keskiakseli on liikkumaton ja pyörivän vaipan laakerointi on hoidettu pallomaisilla rullalaakereilla alle 1700–1800 m/min ratanopeuksilla. Paperikoneen radan nopeuden mennessä tuon yli tulevat rullalaakereiden sallitut pyörimisnopeudet vastaan. Tämä aiheuttaa värinää ja heikentää telojen tarkkuutta. Rullalaakereiden nollakuorimarajoitus aiheuttaa myös ongelmia, kun vierintäelimet alkavat liukua pyörimisen sijaan johtaen vierintäpintojen kulumiseen. Asennettujen rullalaakeroitujen telojen hionta on myös suuri ongelma paperitehtailla, koska laakerin vällys aiheuttaa hiomistilanteessa keinuntaa, jolloin hiomistuloksesta tulee huono. Rullalaakereiden korvaaminen liukulaakereilla vaikuttaa positiivisesti kaikkiin näihin ongelmiin. Liukulaakerit ovat samankal-

taisia elementtejä kuin vyöhykkeiden kuormituskenkien rakenteet. (AEL / Proledge Oy 2013, Telatyypit ja rakenteet.)

Liukulaakerien lisäksi monivyohyketelalta vaaditaan jonkinlaista esijännitysjärjestelmää, jotta profilointimahdollisuutta voidaan käyttää pienemmilläkin viivakuormilla. Esijännitys voidaan saavuttaa esimerkiksi kuvan 14 mukaisella vastavyöhykejärjestelmällä, jossa telan alaosassa on sivusta katsottuna 120° ja 240° kulmassa kaksi vastavyöhykkeen kuormituselementtiä. Vastavyöhykkeiden kuormituselementteihin ohjataan kuormituspainetta samaan tapaan kuin itse kuormituselementteihin, mutta vastavyöhykkeiden elementtejä ohjataan yhdellä venttiilillä, jolloin paine on kaikille elementeille sama. Painetta vaihdellaan profilointitarpeen mukaan. Kuormituselementeille on jokaiselle oma venttiilinsä. (Robertson 2000, 566; Ahlstedt ym. 2010, 89, 94; Lahtinen 2009, 30–31.)

Monivyohyketelojen ohjausjärjestelmä on niin monimutkainen, että sen hallintaan tarvitaan luonnollisesti tietokone. Säädetäviä parametreja on niin paljon, että koneenhoitaja asettaa vain tavoiteprofiilin. Ohjausjärjestelmä on takaisinkytketty säätöpiiri, joka laskee muun muassa tarvittavat öljynpaineet kuormituselementeille. Järjestelmä seuraa koko ajan online-mittareiden avulla paksuusprofiilin muutoksia ja reagoi mahdollisiin heittoihin. Alla on kuva Valmetin vyöhykesäädettävien telojen ohjausjärjestelmästä. (Profiling Sym Rolls, 5.)

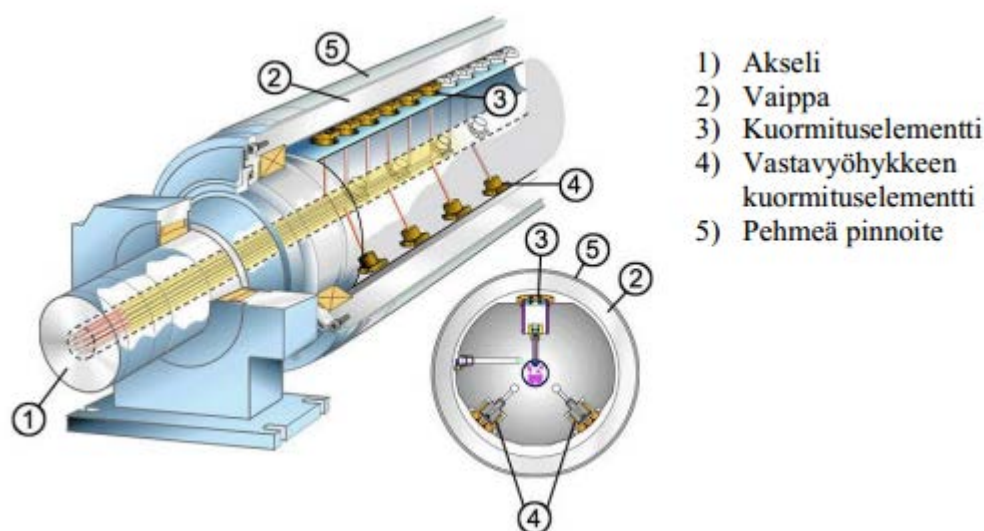


KUVA 13. Vyöhykesäädettävien telojen ohjausjärjestelmä (Profiling Sym Rolls, 5).



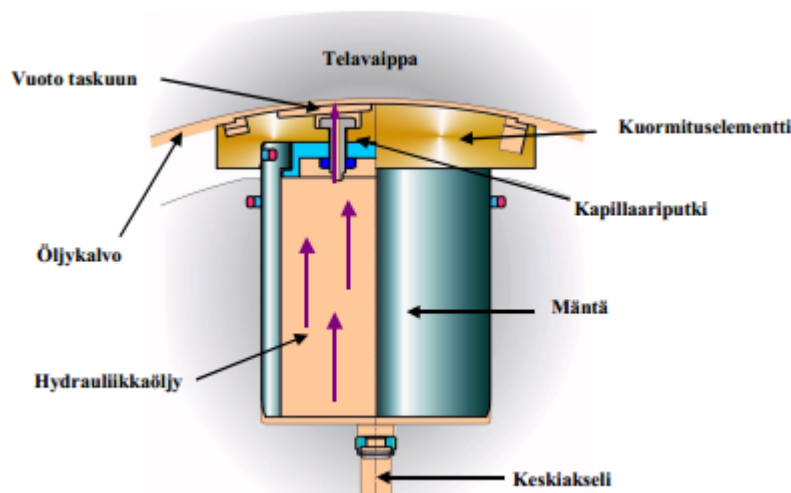
### 5.4.1 Valmetin monivyöhyketela

Valmet valmistaa monivyöhykesäädettäviä teloja sekä rullalaakeroituna että liukulaakeroituna. Rullalaakeroitu monivyöhykesäädettävä tela on tuotenimeltään SymCDS. Tela on liikkuvavaippainen eli kuormituselementit ja runko pysyvät paikallaan vaipan liikkussa. Profilointi tapahtuu kuten muissakin itsekuormittavissa monivyöhyketeloissa nostamalla vaipan pintaa hydraulisesti kuormituselementtien avulla. Kuva 14 havainnollistaa hyvin telan rakenteen. (Lahtinen 2009, 28.)



KUVA 14. Valmetin monivyöhyketela SymCDS (Lahtinen 2009, 28).

Kuvassa 15 on kuvattuna tarkemmin Valmetin monivyöhyketelan kuormituselementin rakenne. Profiloiva vaikutus saadaan aikaan aikaan säätämällä kuormituselementeissä olevaa öljynpainetta. Öljynpaine tuotetaan hydraulikkakoneikolla, joka pystyy tuottamaan painetta maksimissaan 250 baria. Öljy leviää kapillaariputken ja taskun kautta telavaipan ja kuormituselementin väliin, joten osien välille ei muodostu suoraa yhteyttä. (Lahtinen 2009, 29–30.)



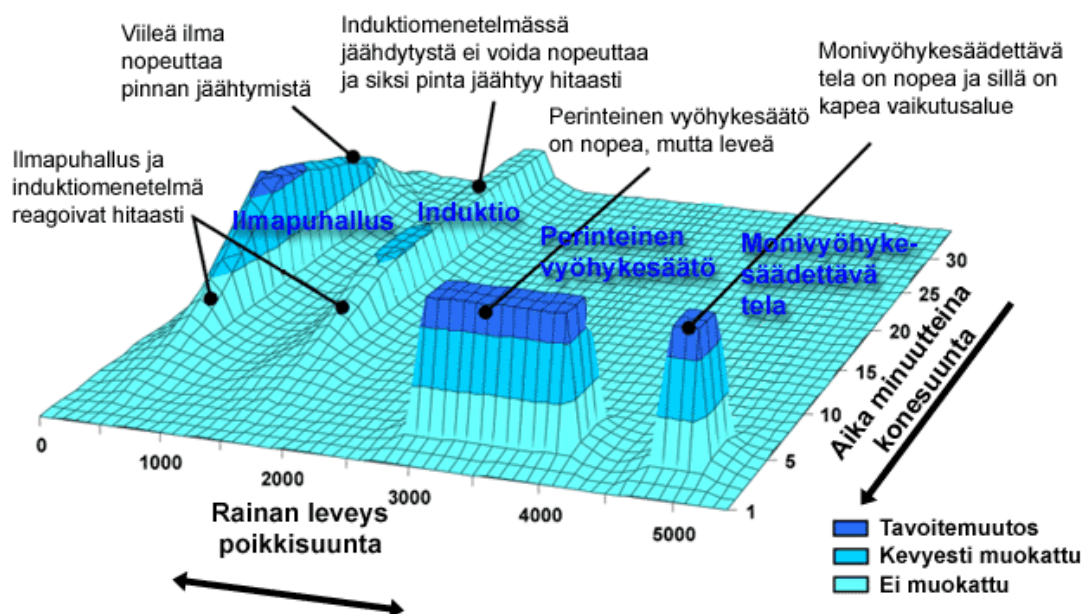
KUVA 15. Valmetin monivyöhyketelan kuormituselementin rakenne (Lahtinen 2009, 28).

#### 5.4.2 Voithin monivyöhyketela

Voith markkinoi monivyöhyketelaansa Nipcorect – tuotenimellä. Telan toiminta perustuu hydrostaattisiin tukielimiin, jotka ovat kiinnitettyinä rullan sisällä olevaan palkkiin. Voithin valmistamassa perinteisessä vyöhykesäädettävässä telassa on normaalisti 12–14 vyöhykettä, kun taas monivyöhyketelassa on 30–60 vyöhykettä. Monivyöhyketelan ja vyöhykesäädettävän telan suurimpia teknisiä eroja on, että monivyöhyketelassa jokaisella tukielementillä on oma öljynsyöttönsä. Teloja saa 1600–10000 millimetrin levyisinä ja niiden maksiminopeus on 2500 m/min. Viivakuormaa voi säätää välillä 1–550 N/mm. (Twogether 2001, 59–60.) Monivyöhyketelalla voidaan profiloida 150 mm levyisiä alueita (Deflection Compensating Rolls by Voith, 12).

## 6 PROFILOINTILAITTEIDEN VERTAILU

Profilointitekniikoiden vasteajoissa ja vaikutusalueissa on suuria eroja. Kuvasta 16 näkee hyvin nämä erot. Taulukosta 1 taas näkee profilointilaitteiden etuja ja haittoja.



KUVA 16. Vyöhykesäädettävien telojen, induktiokuumennuksen ja ilmapuhalluksen vasteaikojen ja vaikutusalueiden vertailua (AEL / Proledge Oy 2013, Kalanterin profiilinsäätölaitteet).

Moniväyhykesäädettävä tela on selvästi nopein ja tehokkain profilointitekniikka. Ohjausjärjestelmän havaitessa paksuusprofiilivirheen sen korjaaminen onnistuu nopeasti korottamalla öljynpainetta hydraulikkajärjestelmässä paperiradan kohtaa vastaavassa vyöhykkeessä. Järjestelmästä riippuen öljynpaineen korotus voi onnistua jopa muutamassa sekunnissa virheen havainnoinnista. Vyöhykkeen palautus takaisin alkuasentoon onnistuu nopeasti pudottamalla öljynpaineet takaisin alkuperäiselle tasolle, kun paksuusprofiilivirhe on korjattu.

Robertsonin (2000, 564–565) mukaan moniväyhyketelalla voidaan profiloida alle 150 mm levyisiä alueita. Kuumailmapuhallustekniikalla voidaan profiloida vielä kapeampia alueita. Esimerkiksi ilmakaapimilla varustetulla kuumailmapuhalluslaitteistolla voidaan profiloida jopa vain hieman päälle 38 mm levyisiä alueita. Induktiotekniikassa lämpöä siirtyy viereisillekin vyöhykkeille, joten profilointivaikutus on jonkin verran itse vyö-

hykkeitä suurempi. Kapeimmat markkinoilla olevat vyöhykkeet ovat 60 mm levyisiä. (Hoelzel 2005, 16, 18.)

Induktiokuumennus ja ilmapuhallustekniikat perustuvat lämpölaajenemisen hyödyntämiseen profiloinnissa, toisin kuin mekaaninen monivyöhykesäätötekniikka. Induktiokuumennuksen ja ilmapuhallustekniikoiden vasteajat ovat samaa luokkaa. Kuvasta 16 voi nähdä, että kalanterin tela alkaa jäähtyä tai lämmetä vasta useiden minuuttien jälkeen paksuusprofiilivirheen havainnoinnista. Induktiotekniikassa telaa ei pysty jäähdyttämään, joten profiilivirheen korjaamisen jälkeen telan muoto palaa alkuperäiseen asentoonsa hitaasti. Kuumailmapuhallustekniikassa ilmaventtiileistä tulee myös viileää ilmaa, joten telan kuumentamisen jälkeen muodon palautus onnistuu nopeammin viileällä ilmalla.

Induktiokuumennuksen ja ilmasuihkujen hitaus korostuu erityisesti pitempien katkojen jälkeen, kun kalanterin telat ovat ehtineet jäähtymään. Laitteistojen toimintakuntoon saattamisessa kestää tyypillisesti 5–15 minuuttia, riippuen paperikoneella olleen katkon pituudesta ja katkon jälkeen tuotetun paperin paksuusprofiilin vaihteluista. Laitteistojen profilointikyvyn palauttamisessa saattaa kestää jopa 18 minuuttia, jos katko on ollut pitkä ja paperin paksuusprofiilissa on suuria heittoja. Pitkä palautumisaika katkon jälkeen johtuu siitä, että laitteistot vaativat kalanterin teloilta tarpeeksi korkean lämpötilan voidakseen toimia. Monivyöhyketela on hydraulisen toimintajärjestelmänsä vuoksi toimintavalmis 2–8 minuutin kuluessa koneen käynnistyksestä. (Robertson 2000, 575–576; Hoelzel 2005, 19.)

Profiilinhallintamenetelmien etuja ja haittoja on lueteltu taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Monivyöhyketelan, induktiokuumennuksen ja ilmapuhalluksen hyötyjä ja haittoja (Ahlstedt ym. 2010, 150).

	Zone-controlled roll	Zone-controlled induction heating	Zone-controlled air showers (heating and cooling)
Investment cost	+	++	+++
Energy efficiency	+++	++	+
Control range	+++	++	+
Response time	+++	+	++
Recovery time	+++	+	++
Robustness	+++	+	+
Total cost, 3 years	+++	++	+

Taulukon 1 ylimmästä sarakkeesta näkee, että monivyöhesäädettävien telojen investointikustannukset ovat korkeimmat ja ilmapuhallustekniikoiden investointikustannukset ovat pienimmät. Monivyöhyketelat ovat laadukkaimpia profiilinhallintamenetelmiä, joten samalla niiden hinta on korkein. Saman taulukon alimmasta sarakkeesta näkee, että pitemmän päälle monivyöhyketelat tulevat kuitenkin halvimmiksi. Tämä johtuu monivyöhyketelojen alhaisimmista käyttökustannuksista. Niiden toimintavarmuus on paras ja ne kuluttavat vähiten energiaa. Lisäksi niiden profilointikyvyn palautus katkojen jälkeen on nopeinta, joten tämän avulla säästyy pitemmän päälle isolta määrältä tuotantotappioita. Ilmapuhallustekniikka on toimintavarmuudeltaan heikoin ja se kuluttaa myös paljon energiaa, joten pitemmän päälle sen kokonaiskustannukset nousevat korkeiksi.

Energiatehokkuus on luonnollisesti paras monivyöhyketelalla, koska se toimii hydraulisesti. Ilmapuhalluksen väliaineena toimii tietenkin ilma, joten energiaa menee profiloinnin aikana suuria määriä hukkaan. Induktiokuumennuksessa ei tarvita väliainetta, vaan ilmiö tapahtuu suoraan telan pinnassa, joten energiatehokkuus on ilmapuhallusta parempi.

Kuten aikaisemmin on käyty läpi, niin nopeimmat vaste- ja palautumisajat ovat monivyöhyketelalla. Tämän näkee myös taulukosta 1. Toiseksi nopeiten toimii ilmapuhallustekniikka. Käyttövarmuuden ja luotettavuuden puolesta paras tekniikka on jälleen monivyöhykesäädettävä tela. Induktiokuumennustekniikan ja ilmapuhallustekniikoiden käyttövarmuudet ovat selvästi huonompia.

## 7 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia paperin paksuusprofiilin hallintaa kalanterilla. Tavoitteena oli tutustua paksuusprofiilin hallintaan käytettävien laitteistojen tekniikkaan ja eri tekniikoiden etuihin ja haittoihin. Laitteistoihin perehdyttiin sekä yleisellä tasolla, että tarkemmin eri valmistajien tarjoamiin ratkaisuihin.

Opinnäytetyön tavoitteet onnistuivat hyvin. Laitteistojen tekniikoihin ja toimintaperiaatteisiin perehdyttiin syvällisesti kirjallisuuden sekä laitetoimittajien antamien tietojen pohjalta. Eri tekniikoiden eduista ja haitoista saatiin muodostettua selvä kuva.

Paperin poikkisuuntaista paksuusprofiilia voidaan hallita kalanterilla neljällä erilaisella tekniikalla. Näistä jäähdytysilmapuhallus, kuumailmapuhallus ja induktiokuumennus perustuvat lämpölaajenemisen hyödyntämiseen profiloinnissa. Kalanterin telan halkaisijaa joko kasvatetaan tai supistetaan kuumentamalla tai viilentämällä sitä kalanterin telan kohtaa, jossa paperiradan paksuusprofiilissa on liian suuria vaihteluita. Ilmapuhallustekniikoissa telaa lämmitetään tai jäähdytetään puhaltamalla viileää tai kuumaa ilmaa kalanterin telaan. Induktiotekniikassa lämmitys hoidetaan sähkömagneettisen induktion avulla. Monivyöhyketelojen toiminta perustuu mekaanisiin vyöhykkeisiin, joita säädetään hydraulisesti kuormituselementeillä. Kuormituselementit kohottavat telavaipan pintaa siltä kohdin, jossa paperi on paksumpaa paperiradan poikkisuuntaiseen paksuusprofiiliin nähden.

Monivyöhyketelat ovat investointikustannuksiltaan kalleimpia, mutta ne ovat myös selvästi tehokkaimpia ja nopeimpia sekä käyttövarmuudeltaan luotettavimpia laitteistoja. Monivyöhyketelojen käyttökustannukset ovat pienimmät, joten pitkässä juoksussa ne tulevat halvimmiksi. Induktiokuumennustekniikka on taloudellisuudeltaan ja käyttövarmuudeltaan toiseksi paras tekniikka. Sen huonoja puolia ilmapuhallustekniikoihin nähden ovat hieman hitaammat vasteajat ja palautumisajat sekä leveämmät profilointivyöhykkeet. Energiatehokkuus on paljon parempi.

Profiilinhallintalaitteet onnistuvat tavoitteessaan eli paksuusvaihtelujen tasaamisessa yleisesti ottaen hyvin. Kalanteri on viimeinen paikka, jossa paksuusvaihteluja voidaan korjata. Vikojen korjausta tärkeämpää on kuitenkin varmistaa tasaisten profiilien muo-

dostuminen jo viiraosalla, jolloin turhalta profiloinnilta vältyttäisiin. Tehtävät eivät ole tietenkään toisiaan poissulkevia, mutta näkisin, että tutkimus- ja kehitystyön keskittäminen rainan muodostumisen tutkintaan olisi pitemmän päälle hedelmällisempää.

## LÄHTEET

AEL / Proledge Oy 2013. KnowPap Versio 15.0. Luettu 15.01.2014.

[http://www.knowpap.com/extranet/english/knowpap\\_system/user\\_interfaces/frontpage.htm](http://www.knowpap.com/extranet/english/knowpap_system/user_interfaces/frontpage.htm)

Ahlstedt, J., Almi, J., Hakola, J., Ilomäki, J., Jaakkola, M., Kautto, M., Kohnen, J., Kettunen, H., Kojo, T., Kuosa, H., Laitio, J., Linja, J., Linnonmaa, P., Nukarinen, K., Paasonen, J., Pihola, P., Remmi, S., Sipilä, K., Suomi, E., Söderholm, T., Talonen, M., Toppila, M., Vaittinen, H. & Ärölä, P. 2010. Calendering. Teoksessa Rautiainen, P. (toim.) Papermaking Part 3, Finishing. 2. painos. Porvoo: WS Bookwell Oy, 150–152.

Calcoil CW Induction Heating System. 2011. Honeywell Oy. Luettu

15.4.2014. <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/notes/CalcoilCWPN1108ENGeop.pdf>

Deflection Compensating Rolls by Voith. Voith GmbH. Luettu

15.4.2014. [http://www.voith.com/en/Produktblatt\\_EcoNip\\_Nipco\\_Nipcorect\\_en.pdf](http://www.voith.com/en/Produktblatt_EcoNip_Nipco_Nipcorect_en.pdf)

Enwald, P., Happonen, E., Hyötynen, S., Jorkama, M., Kojo, T., Paanasalo, J., Paukkunen, P., Pelkonen, J. & Åkerlund, K. 2010. Reeling and Winding. Teoksessa Rautiainen, P. (toim.) Papermaking Part 3, Finishing. 2. painos. Porvoo: WS Bookwell Oy, 178.

Hoelzel, P. Voith Paper Finishing, Springfield, MA. 2005. CD-Caliper Profile Improvement With a New Powerful Multi-Zone Controlled Calender Roll. 2005 TAPPI Practical Papermaking Conference. Milwaukee, WI, United States. 14–18.

IQ Induction Pro. Metso Oyj. Luettu

26.3.2014. [http://www.metso.com/Automation/docs2.nsf/0/BE736B02EE468E80C2257785003AD48F/\\$file/E8341\\_EN\\_02-IQ%20Induction%20Pro.pdf](http://www.metso.com/Automation/docs2.nsf/0/BE736B02EE468E80C2257785003AD48F/$file/E8341_EN_02-IQ%20Induction%20Pro.pdf)

Lahtinen, K-M. 2009. Kalanterin telan vyöhykesäätöventtiilien kunnonvalvonta. Automaatioteknologian koulutusohjelma. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Metso IQ Laser Caliper Measurement. Metso Oyj. Luettu:

25.3.2014. [http://www.metso.com/Automation/docs2.nsf/0/F2B06025A86B333CC225777B003A916A/\\$file/E8738\\_EN\\_02-IQ%20Laser%20Caliper\\_www.pdf](http://www.metso.com/Automation/docs2.nsf/0/F2B06025A86B333CC225777B003A916A/$file/E8738_EN_02-IQ%20Laser%20Caliper_www.pdf)

OnQ ModuleTherm. Voith GmbH. Luettu

21.4.2014. [http://www.voith.com/en/PI\\_Sheet\\_2012-09\\_en\\_OnQ\\_ModuleTherm.pdf](http://www.voith.com/en/PI_Sheet_2012-09_en_OnQ_ModuleTherm.pdf)

Profiling Sym Rolls. Valmet Oyj. Luettu:

22.4.2014. [http://www.valmet.com/valmet/products/Vault2MP.nsf/BYWID2/WID-111019-2256E-6362A/\\$File/32015\\_V1\\_EN.pdf?openElement](http://www.valmet.com/valmet/products/Vault2MP.nsf/BYWID2/WID-111019-2256E-6362A/$File/32015_V1_EN.pdf?openElement)

Robertson, R. A. Valmet. 2000. Advanced Calendering Tehcnology for Cross Direction Caliper Profiling. 2000 TAPPI Papermakers Conference and Trade Fair. Vancouver, BC, Canada. 564–576.

Svensk, T. 2013. Metso IQ Profilers. Paperiteollisuuden automaatio. Opintomateriaali 5.12.2013. Tampereen ammattikorkeakoulu. Tampere.



Schnyder, E., van Haag, R. & Theiler, A. 2001. Nipco. 25 Years of System Know-how Concentrated in Krefeld. Twogether 11/2001, 59–60. [http://www.voithpaper.com/applications/twogether/vp\\_en\\_twogether11\\_19\\_nipco.pdf](http://www.voithpaper.com/applications/twogether/vp_en_twogether11_19_nipco.pdf)

Voith OnQ ModuleTherm. Voith GmbH. Luettu 21.4.2014. <http://www.voith.com/en/products-services/paper/onq-moduletherm-3848.htm>

Wanigaratne, DMS., Faltas, R., Saunders, S. & Virta, M. 2011. Investigation of Reel Hardness Profile Variation and Paper Runnability. Appita Journal: Journal of the Technical Association of the Australian and New Zealand Pulp and Paper Industry. 4/2011, 350–355.

Williamson, M. 2009. Laser Caliper Sensor Beats the Stickies at Golbey. PMD Magazine 1/2009, 35–37.

Williamson, M. 2011. Optical Caliper Sensing Comes of Age. Pulp & Paper International. May 2011, 15–18.